

Каљење

Каљење је процес којим се челик загрева до T (температуре) нешто изнад критичне, а затим хлади брзином већом од критичне у циљу добијања мартензитне структуре, а тиме и високе тврдоће и отпорности на хабање.

Успешно извођење каљења челика зависи од :

1. Температуре загревања, (зависи од садржаја угљеника у челику)
2. Времена загревања,
3. Средине у којој се изводи загревање,
4. Брзине хлађења и прокаљивости.

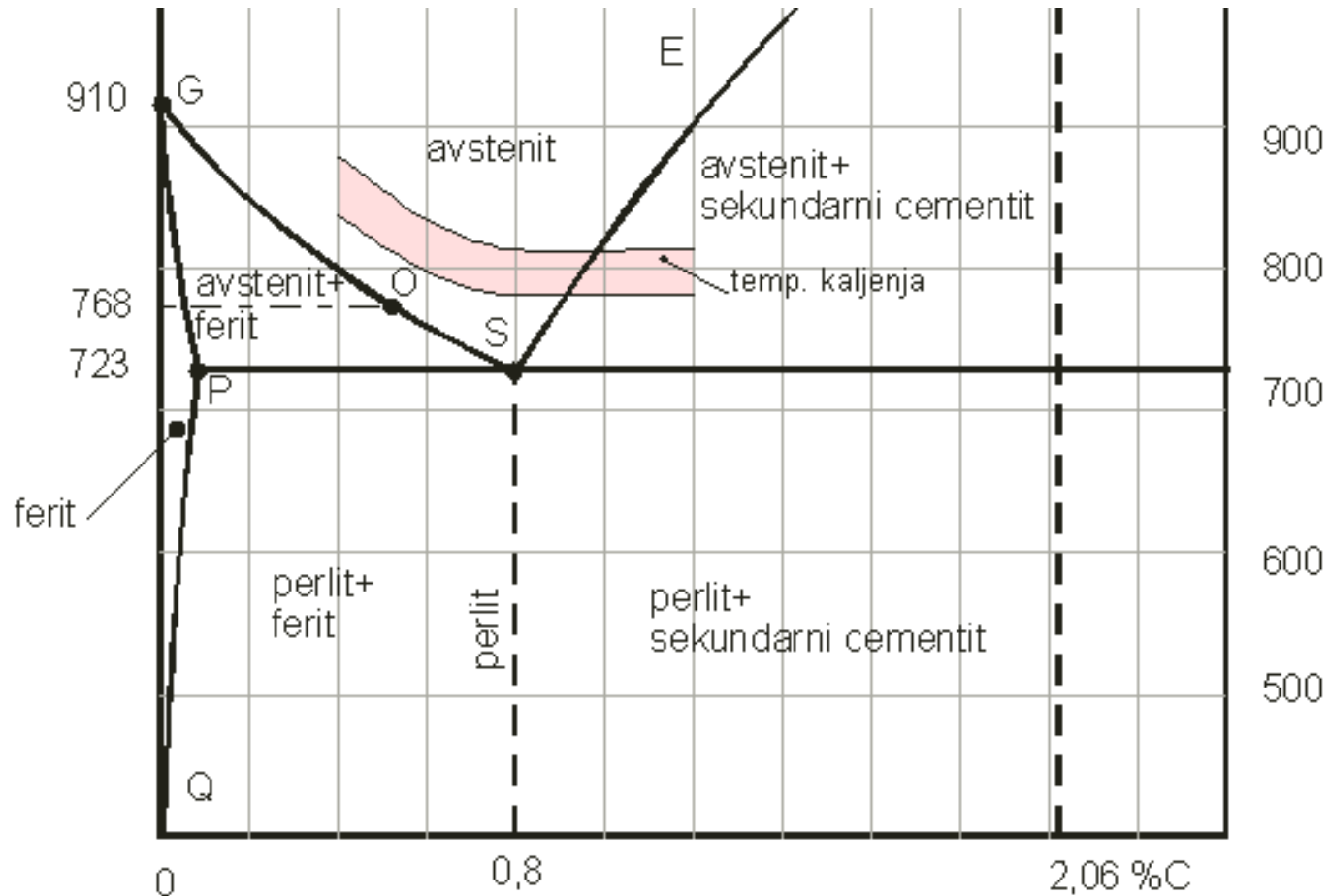
Процес каљења

Температуре загревања за:

Угљенични челик: 770-920 ° C

-Легирани челик од 800 до 1100 ° C

-**visoke brzine čelika** 1200-1300 ° C



Потребно време загревања

Време загревања мора бити довољно дуго да би се обезбедило постизање потребне температуре по целом попречном пресеку дела, као и завршетак свих фазних трансформација.

Не сме бити сувише дуго јер може изазвати пораст аустенитног зрна и разугљенисавање површинског слоја.

Време загревања до задане температуре зависи од :

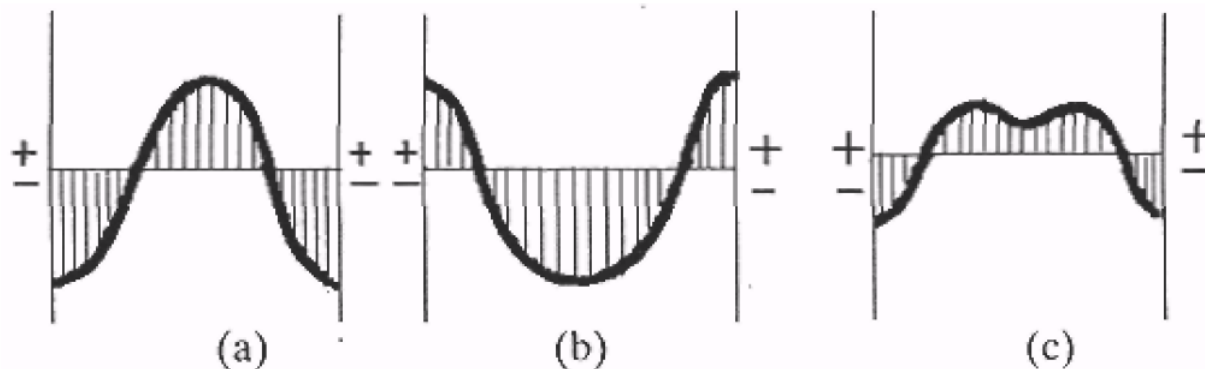
- Температуре загревања,
- Садржаја угљеника и легирајућих елемената
- Величине и облика делова,
- Начина смештаја делова у пећи,
- Врсте пећи.

Средства за хлађење

- Правилан избор средства за хлађење мора да обезбеди:
- Жељену структуру по целом попречном пресеку, без појава већих унутрашњих напона, прслина, деформација.
- **Избор средства за хлађење** бира се у зависности од
- Хемијског састава
- Жељене структуре, димензије и облика дела.
- *Средства за хлађење:*
- Текућа вода, слана вода, водени раствори соли и база,
- Минерална уља, растопљене соли и ваздух.
- **За хлађење угљеничних и нисколегираних челика** – средство је вода и слана вода.
- **За хлађење легираних челика** употребљавају се минерална уља која имају знатно мању брзину хлађења у односу на воду.

Унутрашњи напони у каљеном челику

- Термички напони(услед неравномерног хлађења површинских и унутрашњих слојева)
- Структурни напони(услед повећања запремине неједнолике структуре у површинским и унутрашњим слојевима)
- Укупни напони

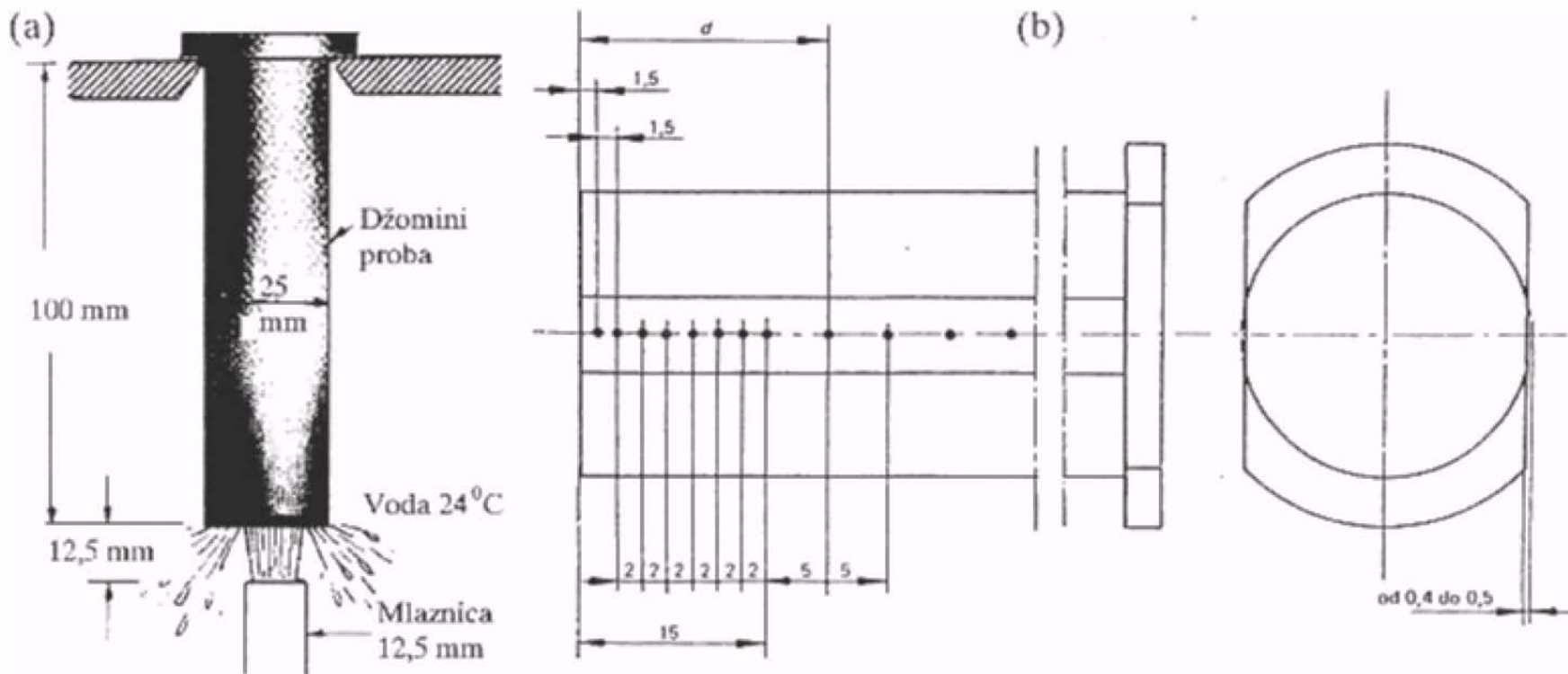


Заостали напони у процесу каљења (а) термички (б) структурни (ц) укупни

Прокаљивост челика

- Способност челика да се каљењем добијени слој мартензитне структуре или мартензитно-труктитне структуре простире до одређене дубине назива се **прокаљивост**.
- Што је мања критична брзина хлађења, већа је прокаљивост и обрнуто, што је већа критична брзина хлађења мања је прокаљивост.
- Прокаљивост челика одређује се чеоним каљење-методом по Џоминију.

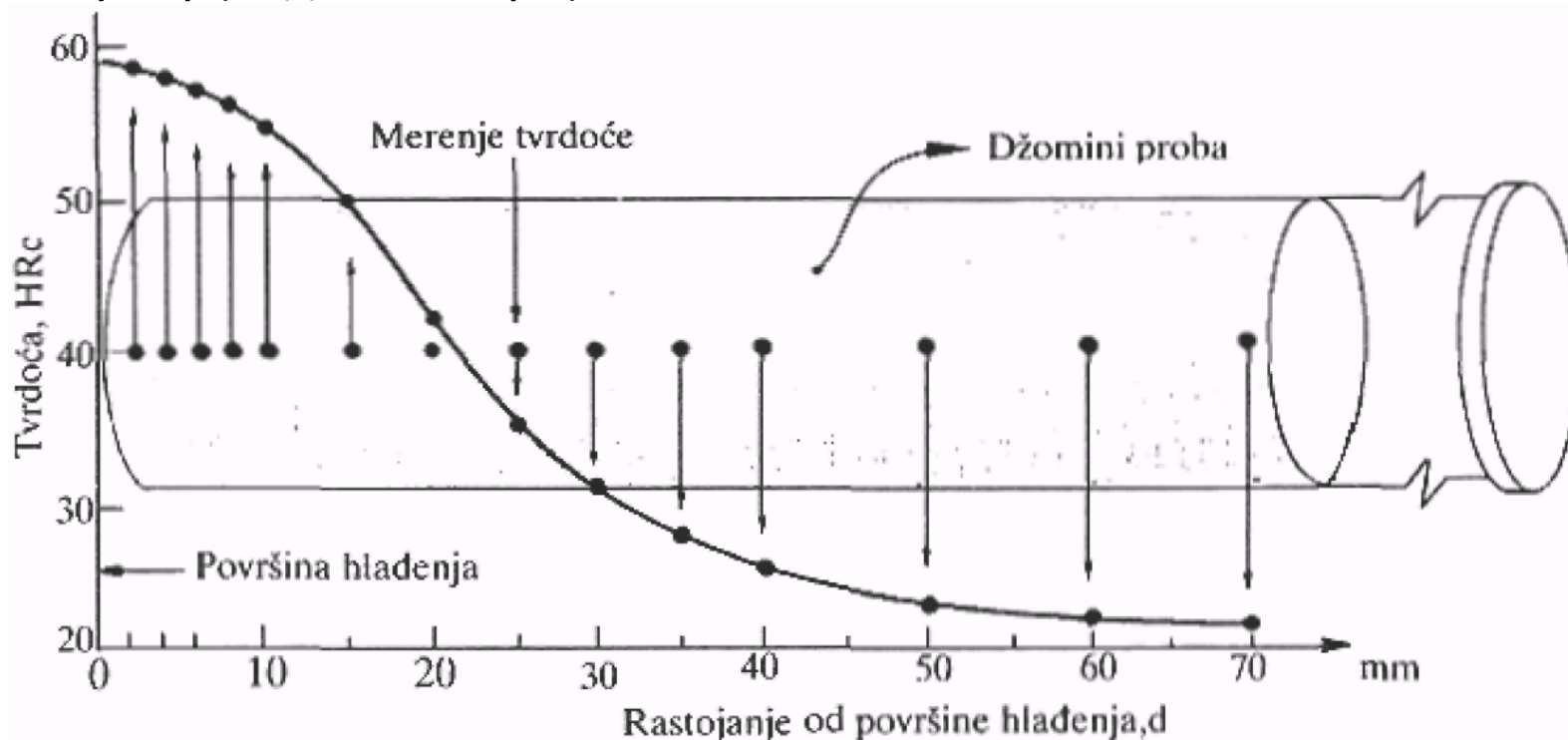
Испитивање прокаљивости (Метода по Џоминију)



Шематски приказ испитивања прокаљивости чеоним хлађењем по методи Џомини.

Крива прокаљивости

Крива прокаљивости конструише се тако што се на апсцисну осу наноси растојање од чеоне површине d , а одговарајућа тврдоћа HRC (средња вредност) на ординатну осу (видети слику 1).



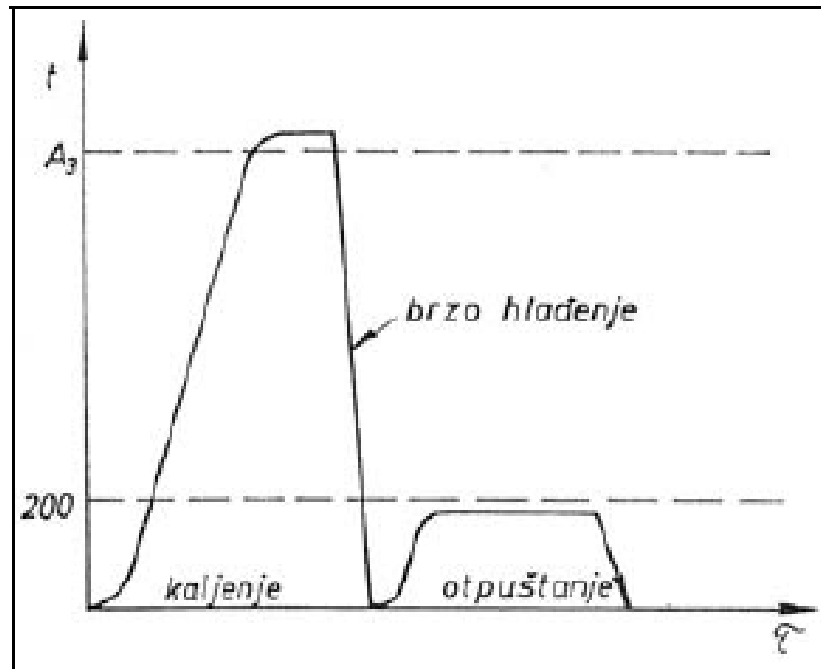
Слика 1 Крива прокаљивости: Тврдоћа у зависности од растојања од чеоне површине хлађења

Начини каљења

- **Континуирано каљење**- обично каљење- (поступак каљења са хлађењем у једном расхладном средству (вода, уље) до потпуног хлађења.
- **Каљење у два средства**
- **Степенасто каљење**
- **Изотермално каљење** (сличан степенастом каљењу)
- **Обрада челика на ниским температурама**

Континуирано каљење- обично каљење

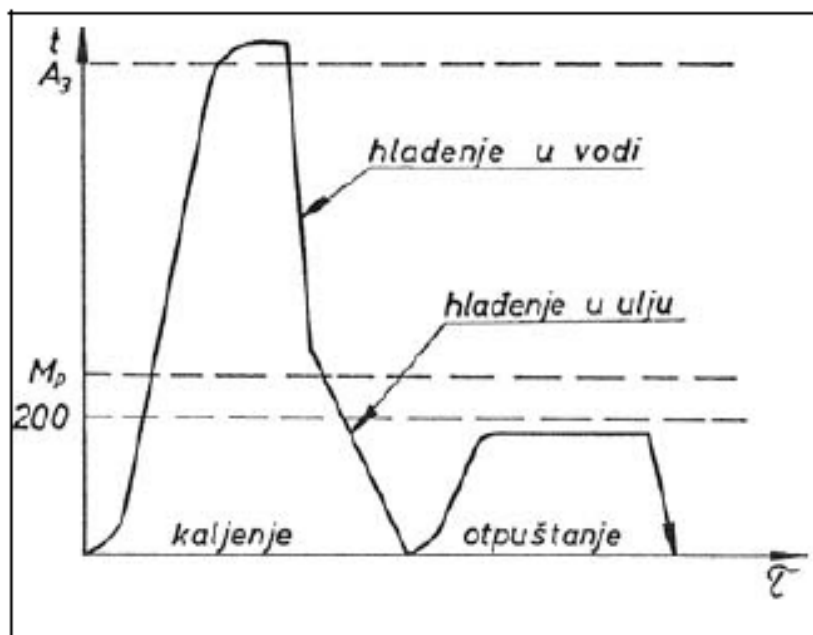
Овај начин каљења примењује се у случају простих комада и врста челика који нису сувише осетљиви на топлотне напоне.



Дијаграм обичног каљења са ниским отпуштањем

Каљење у два средства (средине)

Примењује се код челика са ВЕЛИКОМ критичном брзином хлађења.



Дијаграм каљења у две средине са ниским отпуштањем

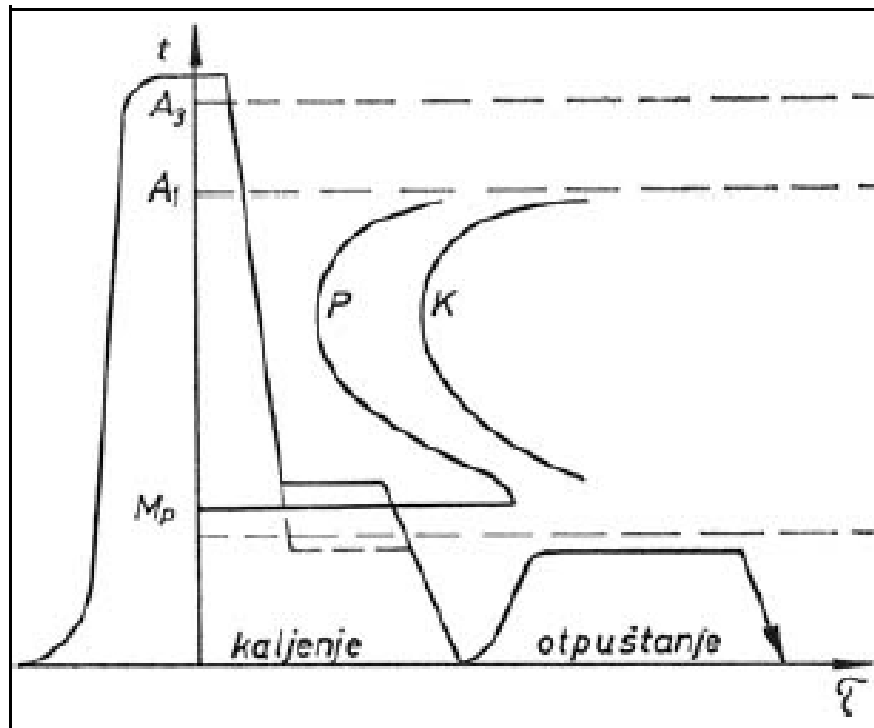
Овај поступак каљења је врло сложен због врло кратког времена хлађења, због чега се у тачно одређеном тренутку мора променити средство за хлађење.

Овај поступак се примењује код високоугљеничних алатних челика.

Степенасто каљење

Степенасто каљење је повољније од каљења у две средине јер се **обавља изотермалним настајањем мартензита**.

Недостатак каљења у две средине је у томе што је на крају брзог хлађења настала температурна разлика на самом комаду и у том стању отпочиње мартензитна трансформација



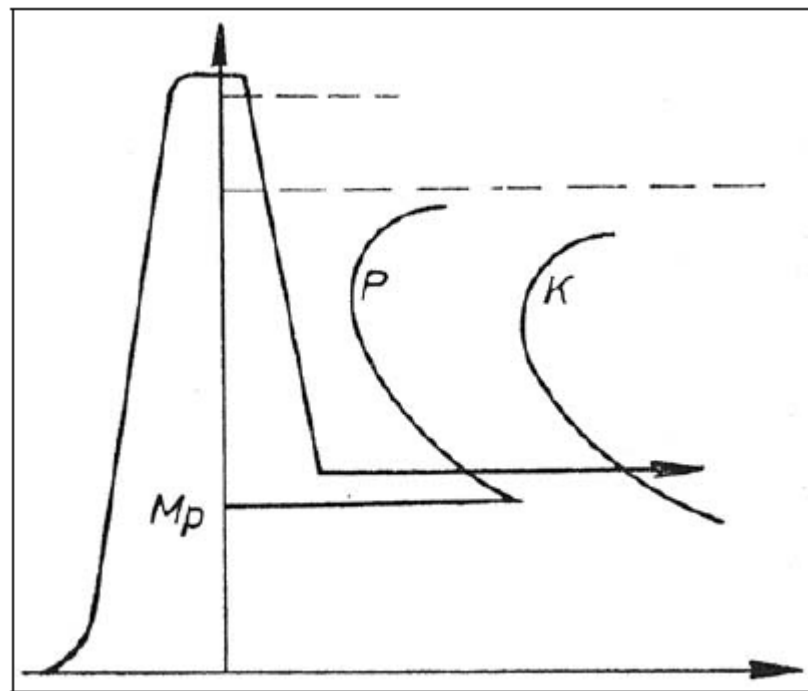
Дијаграм степенастог каљења приказан на ТТТ дијаграму

Изотермално каљење

Изотермално каљење се обавља на некој температури изнад почетка мартензитне трансформације M_p у области доњег беинита као и степенасто каљење у соном купатилу, с том разликом што се време задржавања у купатилу не ограничава, већ се држи све до краја трансформације.

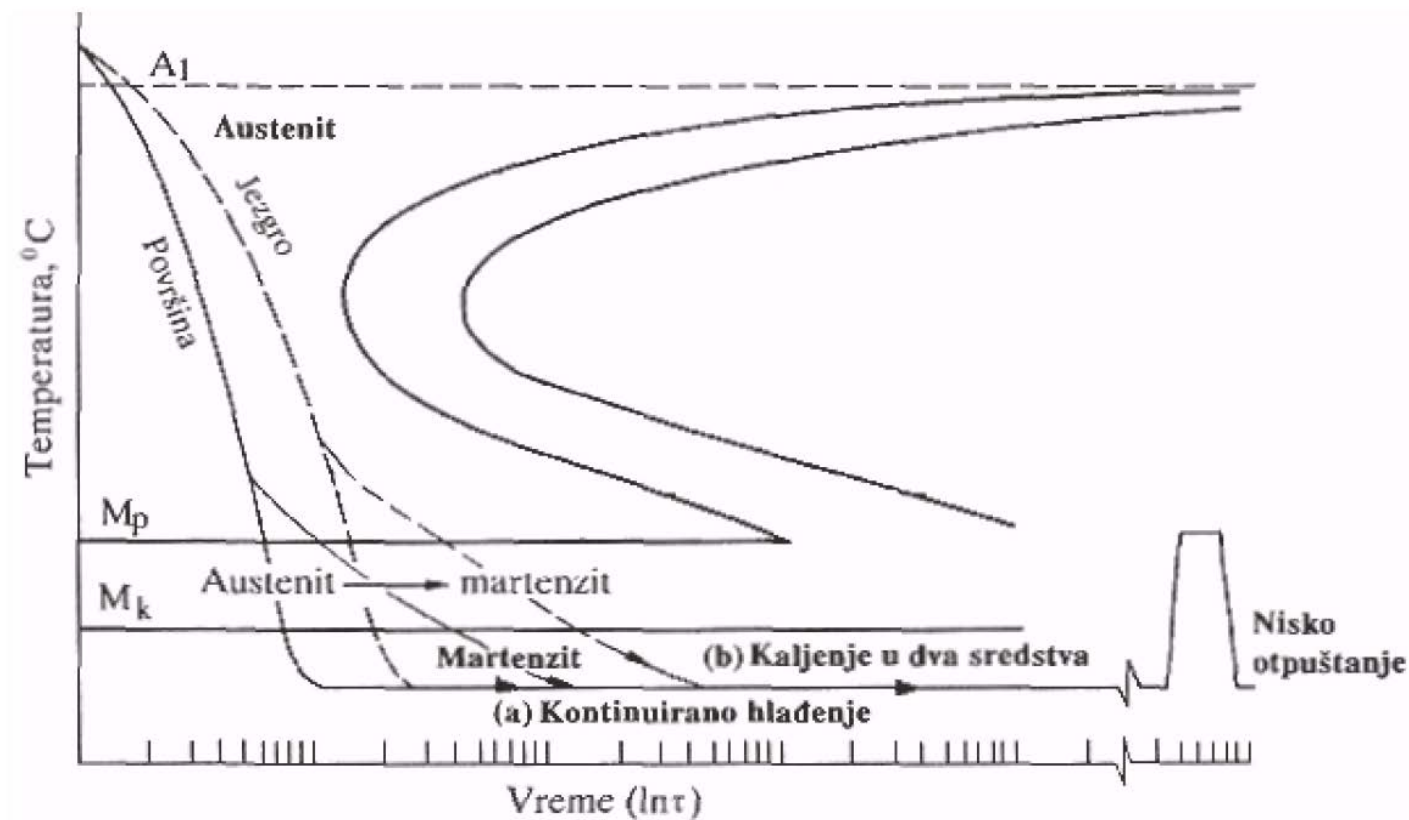
Овај вид каљења се примењује када је потребно постићи

мању тврдоћу
и повећану жилавост.



Принцип изотермалног каљења

Шематски приказ начина каљења

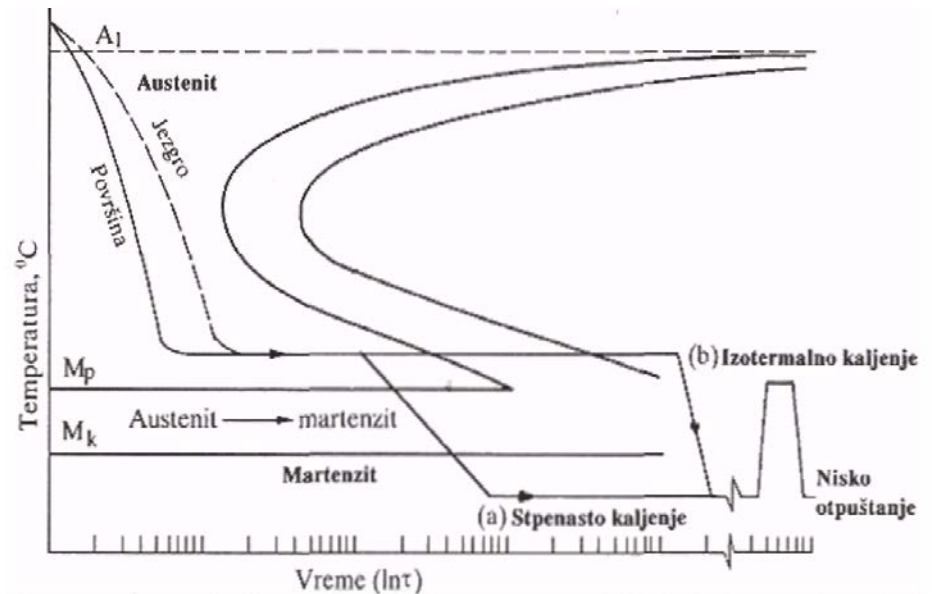


Изотермално каљење

- Делови загрејани до потребних T каљења хладе се у растопљеним солима чија је T нешто изнад T почетка мартензитне трансформације M_p .

Време држања делова у растопљеним солима треба да буде довољно дуго да би се обезбедило разлагање аустенита и образовала структура нижег беинита, а затим се даље хладе на ваздуху.

Легирани челици у процесу изотермалног каљења имају структуру беинита са 20-30% заосталог аустенита. Оваква структура челика има високу чврстоћу и добру жилавост.



Slika 10.29. Šematski prikaz načina kaljenja: (a) stepenasto kaljenje; (b) izotermalno kaljenje.

Обрада челика на ниским температурама

- Суштина ове обраде је у продуженом хлађењу каљених челика до **ТЕМПЕРАТУРА** које су ниже од 0°C са циљем да се заостали аустенит трансформише у мартензит.
- Овој обради подвргавају се челици чија је **ТЕМПЕРАТУРА** завршетка мартензитне трансформације M_k , на температури нижој од 0°C .
- Обрада на ниским **ТЕМПЕРАТУРАМА** мора се урадити непосредно после каљења, јер држање каљених челика неколико часова на собној T (температури) може стабилизovati аустенит и тако смањити ефекат обраде.

Отпуштање

- Термичка обрада којом се каљени челик загрева до температура нижих од тачке A_{C1} , држи на тој температури одређено време а затим споро хлади, и при том проузрокује трансформацију нестабилне структуре каљеног челика у стабилнију структуру назива се отпуштање.
- Ова обрада има за циљ **смањење или потпуно уклањање унутрашњих напона, смањење кртости каљеног челика и добијање жељених структура и механичких својстава.**
- У зависности од температуре загревања разликују се три вида отпуштања: ***ниско, средње и високо.***

Ниско отпуштање

- **Ниско отпуштање** : Загревање до температура од 250°C у трајању од 1 до 2,5 часа и лаганим хлађењем долази до смањења унутрашњих напона, тетрагонални мартензит прелази у мање крти кубни мартензит, повећава се чврстоћа и незнатно жилавост без битнијег смањења тврдоће.
- Каљени челик (0,6-1,3%С) после ниског отпуштања има тврдоћу HRC 58-63.
- Алати за резање и мерни инструменти израђени од угљеничних и нисколегираних челика као и делови после површинског каљења и термохемијских обрада (цементација, цијанизирање и карбонитрирање).

Средње и високо отпуштање

СРЕДЊЕ ОТПУШТАЊЕ

- Загревањем до температура од 350-500 °C и држањем на њима одређено време, велики део угљеника бива истиснут из решетке мартензита.
- Структура челика после средњег отпуштања је *отпуштени трустит*
- Отпуштањем смањује се тврдоћа на HRC 40 ÷ 50, повећава се граница еластичности и жилавост.

ВИСОКО ОТПУШТАЊЕ

ВИСОКО ОТПУШТАЊЕ

Загревањем до температуре од 500-680 °C и држањем 1 до 6 часова на тој температури, у зависности од димензије делова, долази до укрупњавања цементитних ламела, а добијена структура је *отпуштени сорбит*.

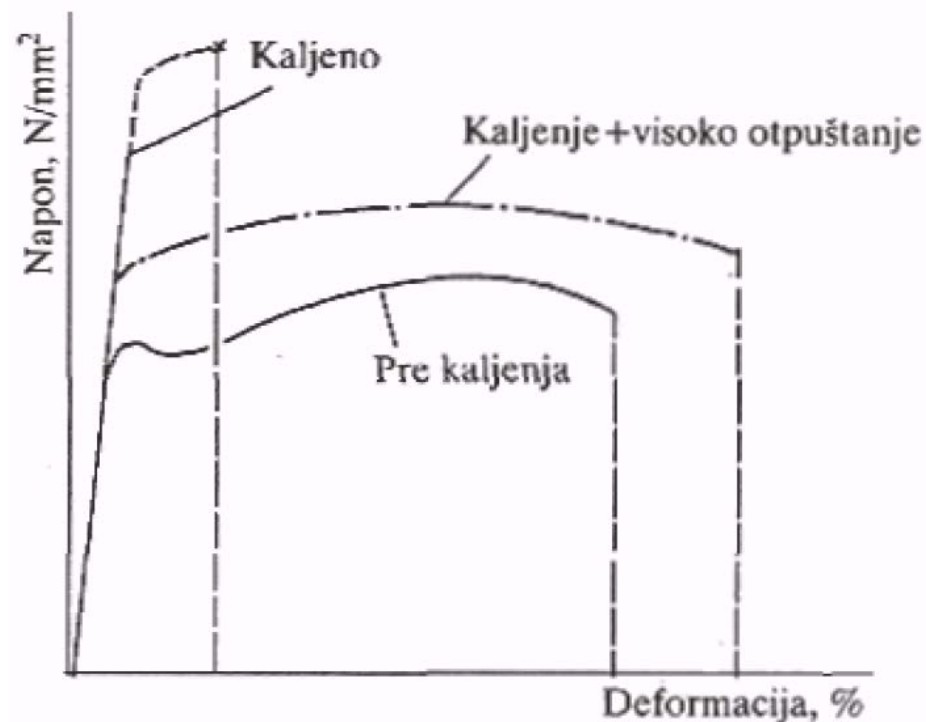
Високим отпуштањем постиже се *најбољи однос између чврстоће и жилавости*.

Побољшање

- **Каљење+ високо отпуштање= побољшање**
- Циљ побољшања је постизање **високе вредности напона течења и високе вредности жилавости.**
- Примена: Конструкциони угљенични (0,3÷0,6%С), ниско и средње легираних челика
- Осовине, вратила, зупчаници и завртњи користе се у побољшаном стању.

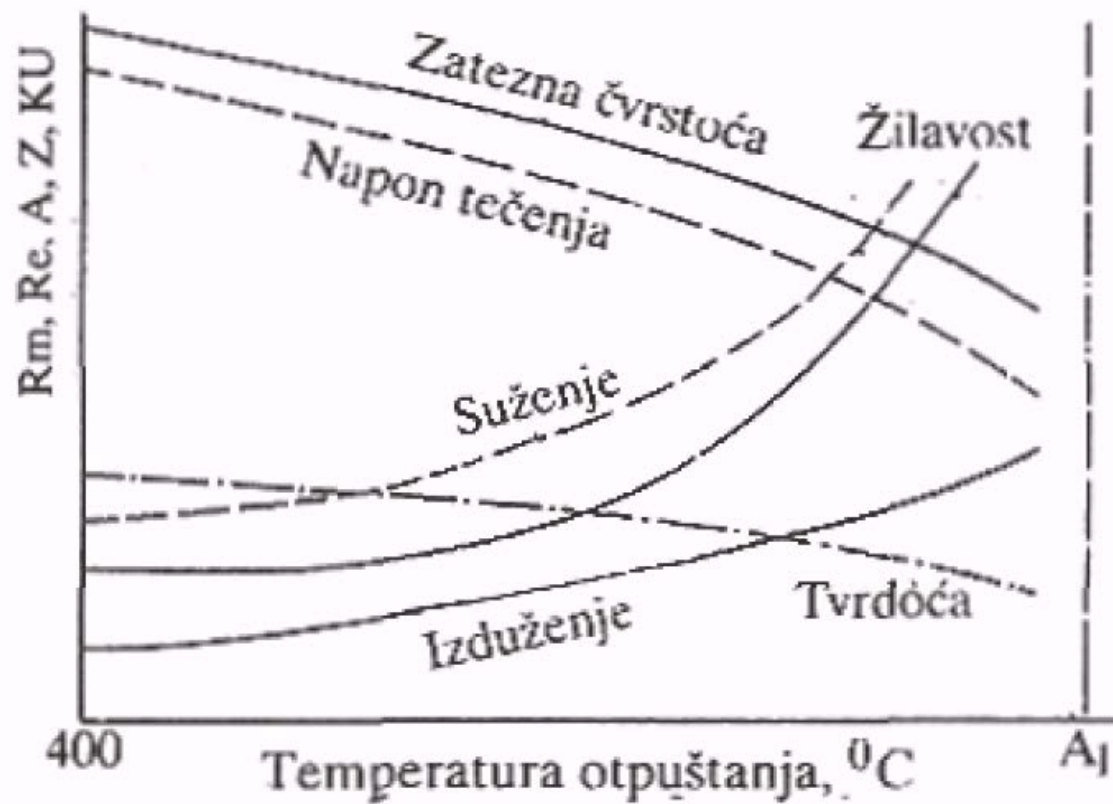
Побољшање

После побољшања челик има већу вредност напона течења и веће издужење него пре каљења.



Дијаграм напон-издужење, пре каљења, после каљења и побољшања

Промена механичких својстава у зависности од температуре отпуштања

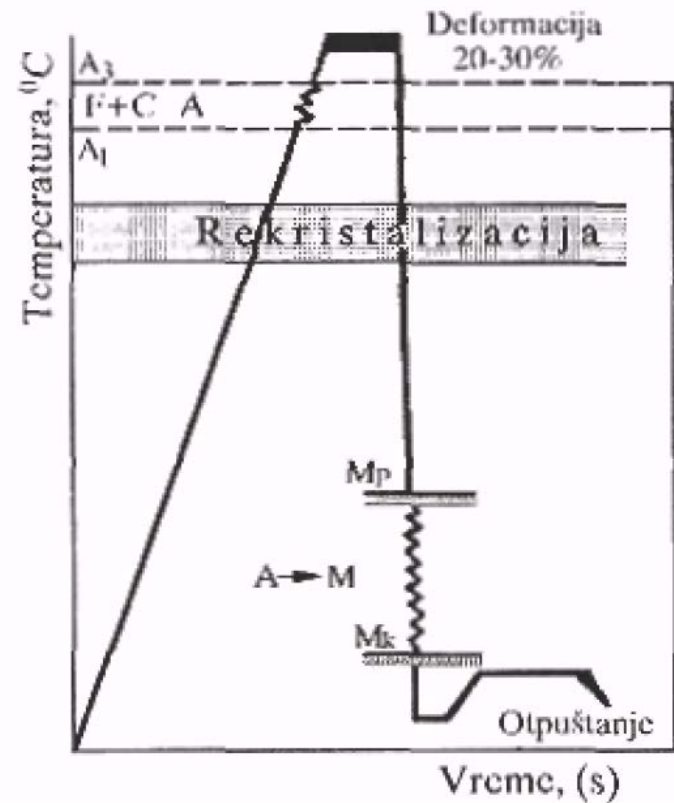


Термомеханичка обрада челика

- Процес термичке обраде којим се челик загрева до температура изнад тачке A_{c3} , држи на тој температури одређено време, а затим добијени аустенит пластично деформише за одређени степен деформације и касније хлади критичном брзином у циљу добијене мартензитне структуре, назива се **термомеханичка обрада**.
- **ВТМО** (високотемпературна термомеханичка обрада)
- Челик (делови) загрева се до температура изнад тачке A_{c3} и касније се пластично деформише (20-30%) а затим се кали и ниско отпушта.
- **НТМО** (нискотемпературна термомеханичка обрада)

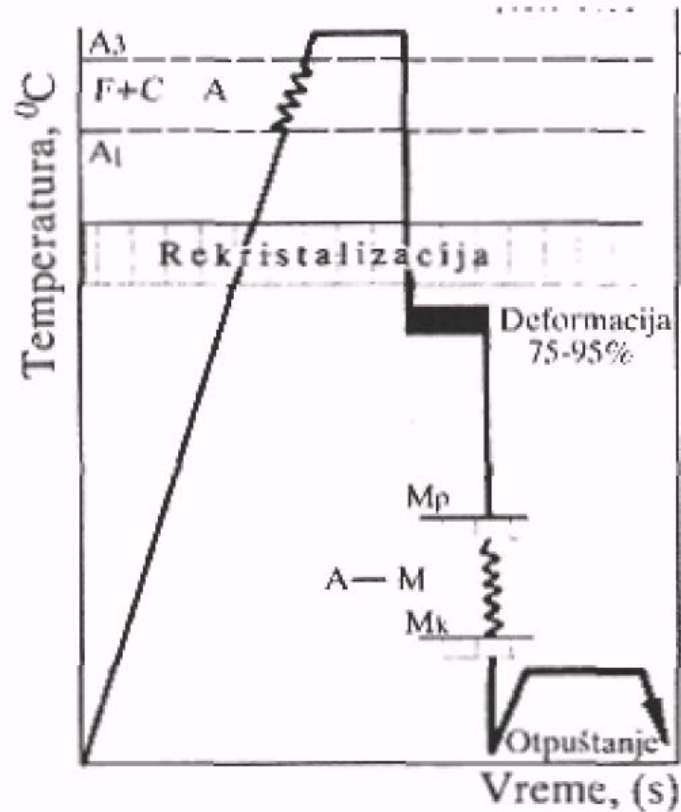
Високо температурна термомеханичка обрада (ВТМО)

Челик (делови) загрева се до T изнад тачке $A_{с3}$ и касније се пластично деформише (20-30%) а затим се кали и ниско отпушта.



Ниско температурна термомеханичка обрада (НТМО)

Челик (делови) загрева се до T изнад тачке A_{c3} хлади до T на којој је аустенит још релативно стабилан, али ниже од T рекристализације пластично деформише на тој T (степен деформације 75-95%) а затим се кали и ниско отпушта.



Површинско каљење челика

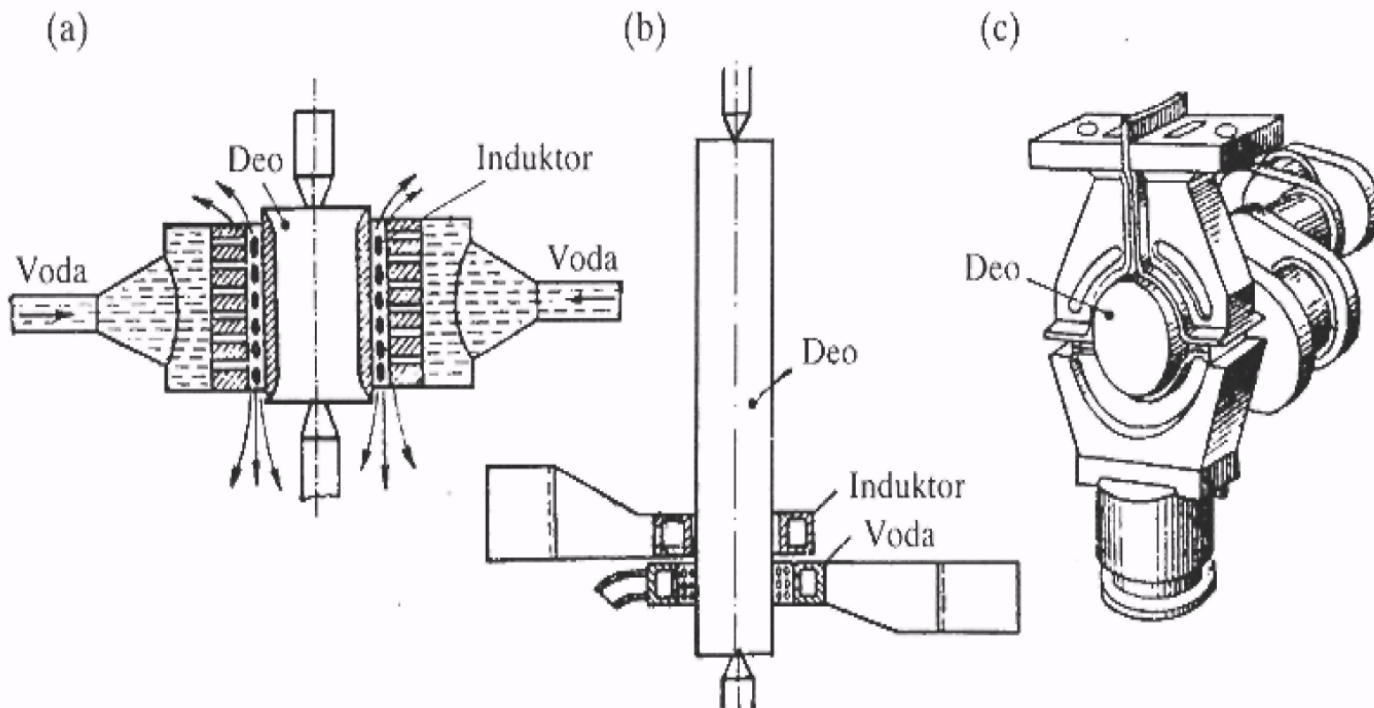
- Процес термичке обраде у којем се загрева површински слој до температура изнад тачке A_{C3} за подеутектоидне челике и изнад тачке A_{C1} за надеутектоидне челике, а затим хлади брзином већом од критичне брзине, са циљем да се у површинском слоју добије **мартензитна структура** назива се површинско каљење.

Основна намена површинског каљења је повећање: површинске тврдоће, отпорности на хабање, отпорности на корозију и динамичке чврстоће.

У индустријској пракси највише се користи поступак:

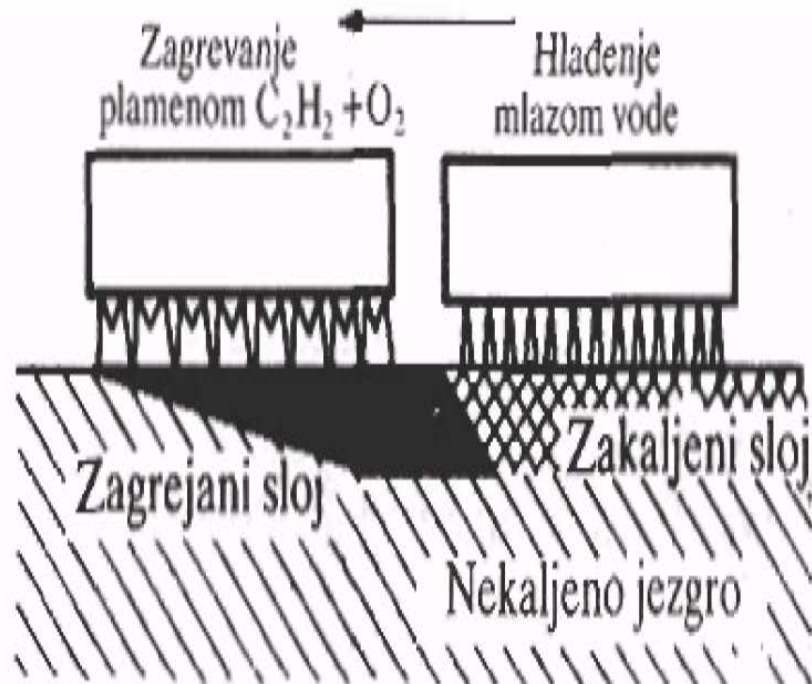
1. Површинско каљење индукционим загревањем,
2. Површинско каљење загревањем гасним пламеном

Површинско каљење индукционим загревањем



Slika 10.32. Šematski prikaz načina površinskog kaljenja indukcijom zagrevanjem:
(a) jednovremeno; (b) neprekidno; (c) pojedinačno.

Површинско каљење загревањем гасним пламеном



Slika 10.33. Šematski prikaz površinskog kaljenja zagrevanjem gasnim plamenom.

Грешке настале у процесу термичке обраде

- Недовољно загревање
- Прегревање
- Прегоривање
- Оксидација и разугљенисавање
- Прслине
- Деформације

Грешке настале у процесу термичке обраде

- Недовољно загревање настаје уколико се челик загреје до температуре које су ниже од потребних.
- Ако се подеутектоидни челик загреје до температуре које су ниже од тачке A_{C3} , што значи да ће део ферита остати нетрансформисан у аустенит.
- Као резултат добија се структура мартензит+ферит.
- Ова грешка може се исправити тако што се недовољно загрејан каљени челик жари, а затим поново загрева до потребних температура.
- ПРЕГРЕВАЊЕ
- До прегревања долази у случају ако се челик загрева до температуре које су много више од потребних (знатно изнад A_{C3} и A_{Cm}). Последица прегревања је **појава крупнозрног аустенита.**

Грешке настале у процесу термичке обраде

- **Прегоривање** настаје у случају када се челик загрева до T које су блиске температури топљења. Прегоривање је праћено издвајањем оксида гвозђа по границама металног зрна због чега су челици веома крти. То је непоправљива грешка.
- **Оксидација и разугљенисавање** челика у процесу загревања долази као последица узајамног дејства његове површине са гасовима који се налазе у атмосфери пећи (кисеоник и водоник).
- Прслине се појављују када унутрашњи напони достигну вредност затезне чврстоће челика.
- Деформације (измене димензија и облика) које настају на деловима при термичкој обради, јесу резултат термичких и структурних напона који се јављају челику услед неравномерног хлађења и фазних деформација.

Пример из праксе

- Челик **Ћ5432 (30CrNiMo8)** (0,3% C;0,25% Si;0,45%Mn;1,95% Cr;1,95%Ni, 0,3%Mo) пречника 63mm треба побољшањем довести на чврстоћу 1100 N/mm²
- Емпиријска формула за затезну чврстоћу високо отпуштеног каљеног челика за побољшање гласи:

$$\sigma_m = 1000 C - 1000 * (C - 0,40) / 3 + 100 Si + 250 Mn + 120 Cr + 300 Mo + 60 Ni + 20 W + 600 ;$$

$$\sigma_m = 900 \text{ N/mm}^{-2}$$

Према дијаграму потребно снижење максималне температуре попуштања износи :

-за каљење у уљу: 0,33°C/N/mm⁻²

-за каљење на ваздуху :0,58 °C/N/mm⁻²

Максимална температура отпуштања по формули гласи:

$$T_{\text{max}} = 695 + 20 * 0.25 - 20 * 0.45 + 20 * 1.8 + 20 * 0.3 - 20 * 1.95 = 694 \text{ } ^\circ\text{C}$$

За каљење у уљу ову температуру треба снижити за :

$$0.33 * (1100 - 900) = 66 \text{ } ^\circ\text{C tj. Na } 694 - 66 = 628 \text{ } ^\circ\text{C}$$